

La natura della luce: una storia travagliata.

di Antonino Giambò

1. Oggigiorno è universalmente accettata l'ipotesi che la luce abbia una *double face*, una doppia natura: sia, precisamente, onda e corpuscolo. Ma prima di giungere a quella conclusione ci sono voluti un bel po' di tempo e varie polemiche che hanno visto coinvolti alcuni personaggi celebri e altri meno famosi.

In questo contributo mi propongo di delineare, ma senza scendere troppo nei dettagli, l'affascinante storia di questa evoluzione.

2. La luce ha diverse proprietà, alcune delle quali note fin dai tempi dell'antica Grecia, come le seguenti:

- propagazione in linea retta in un mezzo omogeneo, isotropo⁽¹⁾ e trasparente,
- riflessione su uno specchio con una precisa legge,
- rifrazione nel passaggio da un mezzo isotropo ad un altro di densità diversa.

Della propagazione rettilinea e della riflessione si occupò **Euclide** (circa 300 a.C.) nell'opera *Ottica e Catottrica*. La legge della riflessione fu anche dimostrata all'incirca nel II sec. d.C. da **Erone** di Alessandria, che ne ha trattato in un'opera intitolata *Catottrica*.

Detto per inciso, "catottrica" è un termine derivato dalla lingua greca (κατοπτρική, *catoptriké*): indica la parte dell'ottica che studia per l'appunto la riflessione della luce.

Del contributo di Erone ho scritto qualcosa in un precedente articolo (*Geodetiche*) pubblicato su questa medesima rubrica e a quell'articolo rimando.

Qui voglio fare invece un cenno alla riflessione secondo Euclide [4, pag. 2201]. Egli ipotizza che, se da un occhio B si muove verso uno specchio piano AC un raggio visivo BK, che sia riflesso fino a D (figura 1), allora, posto che BC e DA siano perpendicolari ad AC, vale la seguente proporzione:

$$BC/CK = DA/AK.$$

Sulla base di questa ipotesi Euclide conclude che i triangoli BCK e DAK sono simili e, pertanto, che gli angoli $\widehat{B\hat{K}C}$ e $\widehat{D\hat{R}A}$ sono uguali.

Riguardo alla rifrazione, i Greci ne conoscevano il fenomeno. Lo aveva scoperto l'astronomo **Cleomede**, vissuto in un periodo imprecisato fra il I sec. a.C. e il I sec. d.C.. Egli precisamente, nella sua opera *Motu circolari corporum coelestium*, ipotizza che i raggi del Sole non attraversano l'atmosfera in linea retta, ma subiscono una deviazione verso la Terra, a causa della diversa densità degli strati atmosferici. Esattamente come avviene con un oggetto pesante (un sassolino, un anello, una monetina, una medaglietta) posto nel fondo di un pentolino vuoto con pareti opache: l'oggetto, invisibile da una determinata posizione (O) (figura 2a), diventa visibile, anche se rimane situato nel fondo del pentolino, se nel pentolino stesso è versata dell'acqua, come se l'oggetto si fosse sollevato un po' (figura 2b).

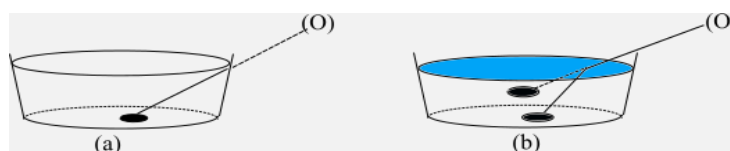


figura 1

I Greci, dunque, conoscevano il fenomeno della rifrazione della luce, ma non ne conoscevano la legge, anche se ci sono andati abbastanza vicino con l'opera di **Claudio Tolomeo**, matematico e astronomo alessandrino, vissuto nel II sec. d. C., il quale ne ha trattato nell'opera *Ottica*.

¹ Un mezzo si dice *isotropo* se le sue caratteristiche sono invarianti rispetto alla direzione, cioè non cambiano se cambia la direzione.

Le leggi della riflessione e della rifrazione della luce furono dimostrate dal francese **Pierre de Fermat** (1601-1665). Pure di questo ho fatto un cenno nel succitato articolo.

Per la verità, la legge della rifrazione della luce era stata trovata sperimentalmente nel 1621 dal fisico olandese **Willebrord Snel van Royen** (1580-1626), ma fu resa pubblica solo nel 1703 ad opera del connazionale **Christian Huygens** (1629-1704).

A dirla tutta, questa legge, in termini diversi ma equivalenti, figura anche in un manoscritto risalente all'anno 984, opera di un matematico persiano di nome **Ibn Sahl**, di cui si sa ben poco. Questo manoscritto è rimasto sconosciuto nell'Occidente fino all'anno 1993, quando è stato pubblicato, assieme ad altre opere, dall'egiziano Roshdi Rashed, matematico e storico della scienza e particolarmente di quella araba.

La stessa legge della rifrazione della luce fu inoltre riscoperta nel 1601 dall'astronomo e matematico inglese **Thomas Harriot** (1560-1621), Ma pure lui non pubblicò il suo lavoro.

Tutto questo per dire che la legge della rifrazione della luce, nonostante abbia avuto alcuni padri prima di lui, passò alla storia come **legge di Snell**.

Insomma, verso la fine del Seicento erano note agli studiosi sia la legge della riflessione della luce sia la legge della rifrazione. Ricordo queste leggi, a beneficio di quei due o tre che le avessero dimenticate.

LEGGE DELLA RIFLESSIONE (figura 3): Se un raggio luminoso incide su uno specchio in un punto I, rimbalza (*si riflette*) in modo che il raggio incidente AI, il raggio riflesso IB e la normale in I allo specchio siano complanari e inoltre l'angolo i che il raggio incidente forma con la normale (*angolo di incidenza*) sia uguale all'angolo r che il raggio riflesso forma con la normale (*angolo di riflessione*), ossia: $i = r$.

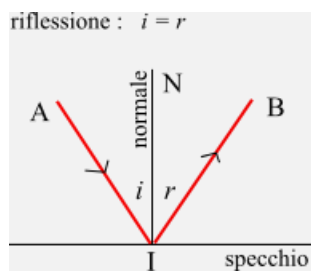


figura 3

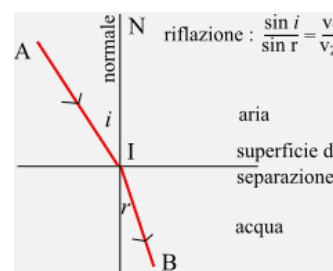


figura 4

LEGGE DELLA RIFRAZIONE (figura 4): Se un raggio luminoso attraversa la superficie di separazione di due mezzi trasparenti (per esempio: aria/acqua), incidendo su questa superficie in un punto I, passa nel secondo mezzo (*si rifrange*) subendo una deviazione in modo che il raggio incidente AI, il raggio rifratto IB e la normale in I alla superficie di separazione siano complanari e inoltre l'angolo i che il raggio incidente forma con la normale (*angolo di incidenza*) e l'angolo r che il raggio rifratto forma con la normale (*angolo di rifrazione*) siano tali che risulti:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2},$$

dove v_1 e v_2 sono le velocità della luce rispettivamente nel primo e nel secondo mezzo.

Ora, siccome nell'urto contro una parete e nel passaggio da un mezzo a un altro, leggi analoghe a quelle descritte erano conosciute sia per le particelle materiali sia per le onde meccaniche (come le onde sonore), sorsero due correnti di pensiero:

- una ipotizzava che la luce fosse un'onda e quindi un trasferimento di energia e non di materia: è nota come **teoria ondulatoria** ed ebbe come suo principale esponente e fondatore **Christian Huygens**. Egli la formulò nel 1678, anche se la rese pubblica nel 1690 nel suo *Traité de la lumière*;
- l'altra ipotizzava che la luce fosse costituita da corpuscoli che si propagano in linea retta: è nota come **teoria corpuscolare** ed ebbe come suo fondatore e principale esponente il fisico e matematico inglese **Isaac Newton** (1642-1727), che se ne occupò nell'opera *Opticks*, uscita nel 1704, ma contenente memorie del 1672 e del 1675 [5];

Entrambe le teorie concordavano nello spiegare sia il fenomeno della propagazione rettilinea sia la riflessione con la sua legge. Ma differivano nella rifrazione: non nella possibilità di spiegare il fenomeno, bensì nella formulazione della sua legge. Precisamente, le due teorie ottenevano leggi in contraddizione fra loro. Per le due teorie, ondulatoria e corpuscolare, le leggi erano infatti rispettivamente le seguenti:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}, \quad \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_2}{v_1},$$

dove, ribadisco, v_1 e v_2 sono le velocità della luce rispettivamente nel primo e nel secondo mezzo.

Ora, siccome nel passaggio dall'aria all'acqua la luce devia avvicinandosi alla normale ($i > r$ e quindi $\sin i > \sin r$), cosa che gli esperimenti evidenziano chiaramente, nel primo caso (teoria ondulatoria) la velocità di propagazione nell'aria deve essere maggiore che nell'acqua ($v_1 > v_2$); nel secondo caso deve essere il contrario ($v_2 > v_1$).

Anche **René Descartes** (italianizzato **Cartesio**, 1596-1650) si era occupato della riflessione e rifrazione della luce. Lo aveva fatto nella prima delle tre appendici al *Discours de la methode* (1637), la *dioptrique*.

Ritengo interessante riportare le conclusioni cui giunge Cartesio in merito alla rifrazione.

Con riferimento alla figura 5, che riproduce quella utilizzata da Cartesio [2, pag. 149] e con qualche licenza nell'esposizione del concetto:

« [...] se nell'aria, da A verso B, passa un raggio che, incontrando nel punto B, la superficie del vetro, devia in questo vetro verso I e se ne viene un altro da K verso B che devia verso L, [...] tra le linee KM e LN vi deve essere la stessa proporzione che c'è tra AH e IG.»

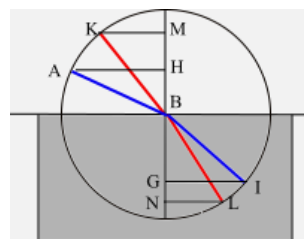


figura 5

Anche per Cartesio, dunque, è costante il rapporto fra l'angolo d'incidenza e quello di rifrazione., ché proprio a questo rapporto sono uguali i rapporti KM/LN e AH/IG. E siccome egli assimila questo comportamento della luce a quello di una pallina che, una volta lanciata, passa dall'aria all'acqua, sembra concepire la luce come una particella., proprio come farà Newton circa 35 anni dopo.

All'epoca in cui avvenivano questi fatti non si conosceva la velocità di propagazione della luce nei vari mezzi, per cui non c'era modo di stabilire sulla base di questo parametro chi avesse ragione e chi torto. Finì che prevalse il "principio di autorità", per cui ebbe il sopravvento chi riscuoteva più prestigio, cioè Newton.

Cosicché si affermò la teoria corpuscolare.

I sostenitori di questa teoria ebbero d'altro canto buon gioco poiché muovevano agli avversari un'obiezione non da poco. Spieghiamo di che si tratta.

Le onde meccaniche, come il suono, hanno bisogno di un mezzo per propagarsi. Se, infatti, si mette sotto una campana una suoneria e si aspira via via l'aria dall'interno della campana con una pompa pneumatica, si può costatare che il suono gradualmente si affievolisce fino a sparire quasi del tutto. Se la luce è un'onda, come fa a propagarsi, per esempio dal Sole alla Terra, considerato che deve attraversare lo spazio vuoto? Non lo può fare e quindi non è un'onda, concludevano gli oppositori della teoria ondulatoria.

Per ovviare a questa obiezione i seguaci della teoria ondulatoria si videro costretti a ipotizzare l'esistenza di una sostanza, l'*etere*, che pervade tutto l'Universo. Solo che questa sostanza dovrebbe avere caratteristiche piuttosto controverse: essere invisibile, trasparente e senza peso, essere elastica e vibrare sotto l'effetto delle onde luminose. Per non parlare di altre caratteristiche contraddittorie che qui non possiamo elencare. Insomma una sostanza improbabile.

Mi pare significativo al riguardo un passo tratto da un libro di Einstein e Infeld [3, pagg. 117-118]:

«Secondo Huygens la luce è un'onda, un trasferimento cioè di energia e non già di sostanza. Abbiamo visto che la teoria corpuscolare spiega molti dei fatti osservati. La teoria ondulatoria è anch'essa in grado di farlo?»

Dovremo rinnovare gli interrogativi [...] sotto forma di dialogo fra N e H, in cui N è un fedele della teoria corpuscolare di Newton ed H un seguace della teoria di Huygens. [...]

«N. [...] Ogni specie di onda deve avere un mezzo materiale in cui viaggiare. Orbene la luce attraversa il vuoto, ciò che il suono non fa. Ammettere un'onda nello spazio vuoto significa in realtà non ammettere onda nessuna.

«H. Sì, questa è una difficoltà ed essa non mi giunge nuova. Il mio maestro vi rifletté profondamente e venne alla conclusione che l'unica via d'uscita era quella di assumere una sostanza ipotetica cioè l'etere, un mezzo trasparente e permeante l'universo intero. L'universo è, per così dire, immerso in etere. Se abbiamo il coraggio di assumere questo concetto, tutto il resto diventa chiaro e convincente.

«N. Ma io respingo questa congettura. In primo luogo essa introduce una nuova sostanza ipotetica ed in fisica ne abbiamo già fin troppe. C'è anche un'altra obiezione. Voi ritenete, senza dubbio, che tutto vada spiegato per mezzo della meccanica. Ma come faremo con l'etere? Siete voi in grado di rispondere al semplice quesito di quale sia la struttura conferita all'etere dalle sue particelle elementari e del come l'etere si palesi in altri fenomeni?

«H. [...] Non possiamo ancora dare una spiegazione meccanica dell'etere. Ma non v'ha dubbio che la sua struttura verrà messa in chiaro dai futuri studi sui fenomeni ottici e forse altri. Per il momento dobbiamo rimanere in attesa di nuovi esperimenti ed argomenti, ma ritengo che alla fine si riuscirà certamente a chiarire il problema della struttura meccanica dell'etere.»

In realtà, alla teoria ondulatoria non serviva l'etere, ma questo si scoprirà molto tempo dopo. Ne parleremo.

Per adesso spendiamo qualche parola per spiegare come si è giunti alle due contrapposte leggi sulla rifrazione.

- RIFRAZIONE NEL MODELLO CORPUSCOLARE.

Quando un corpuscolo di luce, passando per esempio dall'aria all'acqua, colpisce la superficie di separazione dei due mezzi, la forza di attrazione, esercitata su di esso dalle particelle materiali di questa superficie, agendo perpendicolarmente alla superficie stessa, modifica la velocità del corpuscolo e quindi anche la sua quantità di moto. La direzione del moto nell'acqua deve essere tale, però, che si conservi la quantità di moto del corpuscolo di luce secondo la superficie di separazione.

In particolare (figura 6), se sono $\vec{AI} = m\vec{v}_1$ e $\vec{BI} = m\vec{v}_2$ le quantità di moto del corpuscolo di luce rispettivamente nel primo mezzo e nel secondo, le quantità di moto secondo la superficie di separazione saranno rispettivamente: \vec{HI} e \vec{IK} e deve essere: $\vec{HI} = \vec{IK}$.

Siccome: $\vec{HI} = \vec{AI} \sin i$ e $\vec{IK} = \vec{BI} \sin r$, allora si ha: $mv_1 \sin i = mv_2 \sin r$. E da qui segue:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_2}{v_1}.$$

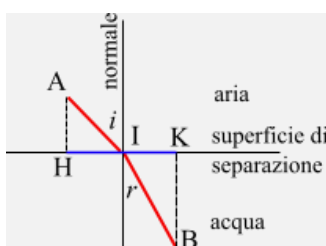


figura 6

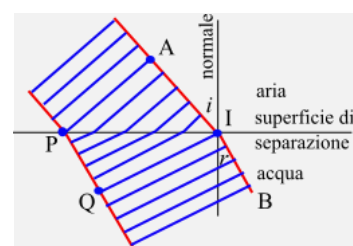


figura 7

- RIFRAZIONE NEL MODELLO ONDULATORIO.

Quando un'onda (per esempio un'onda piana cioè un'onda con un fronte d'onda piano), passando per esempio dall'aria all'acqua, colpisce la superficie di separazione dei due mezzi, penetra nell'acqua subendo un cambiamento di velocità e un cambiamento di direzione. Poniamo l'attenzione sul fronte d'onda PA (figura 7), dove P è il punto della superficie di separazione che è colpito per primo, e sia AI la sua direzione. Le velocità di propagazione dell'onda nell'aria (v_1) e nell'acqua (v_2) sono tali che, nel tempo t in cui l'onda ha

percorso il tratto AI nell'aria, nello stesso tempo essa ha percorso il tratto PQ nell'acqua, per cui il nuovo fronte d'onda è QI.

Risulta: $\overline{AI} = v_1 t$ e $\overline{PQ} = v_2 t$. D'altro canto, è: $\overline{AI} = \overline{PI} \sin i$ e $\overline{PQ} = \overline{PI} \sin r$. Quindi deve essere:

$$\overline{PI} \sin i = v_1 t, \quad \overline{PI} \sin r = v_2 t.$$

E da qui, effettuando il rapporto membro a membro, segue:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}.$$

3. Il prevalere della teoria corpuscolare su quella ondulatoria perdurò fino all'inizio del XIX secolo, quando le sorti della partita si rovesciarono.

Infatti, nel 1801 lo scienziato britannico **Thomas Young** (1773-1829) realizzò un esperimento che spostò le sorti del contendere a favore della teoria ondulatoria. L'esperimento è conosciuto come *interferenza da doppia fenditura*. Consiste nell'indirizzare un fascio di luce su due fenditure parallele, di idonea larghezza, praticate su una superficie opaca: oltre la superficie e su un apposito schermo si ottiene una zona centrale di massima luminosità e, simmetricamente rispetto a tale zona, compaiono bande di luce alternate a bande oscure. Esattamente come nel caso in cui un tremo d'onde liquide, generate in un apposito ondoscopio, è indirizzato verso

uno schermo in cui sono praticate appunto due idonee fenditure parallele F_1 e F_2 (figura 8). Da queste si generano delle onde circolari che interferiscono fra loro.

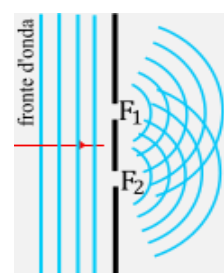


figura 8

Ci sarebbe da spiegare come mai, nel passaggio attraverso le fenditure, si generino onde circolari. Diamo di nuovo la parola ad Einstein ed Infeld [3, pagg. 123-124]:

«Avevmo occasione di discutere un esperimento assai semplice, secondo il quale uno schermo contenente un foro veniva collocato davanti ad una sorgente luminosa puntiforme che proiettava su di una parete l'immagine del foro, contornata da un'ombra nettamente delimitata. Semplifichiamo in primo luogo l'esperimento, valendoci di una sorgente di luce omogenea che, ad ogni buon fine, converrà sia piuttosto forte. Riduciamo inoltre le dimensioni del foro nello schermo. Se riusciamo ad ottenere un forellino molto piccolo e se la sorgente di luce è abbastanza forte assisteremo ad un fenomeno [...] affatto incomprensibile in base alla teoria corpuscolare. Non vedremo più una separazione netta fra luce ed oscurità. La luce si smorzerà gradualmente passando al fondo scuro con una serie di anelli chiari e scuri. Ma l'apparizione di anelli è caratteristica dei processi ondulatori.»

È il fenomeno della *diffrazione* della luce, spiegabile dunque con la teoria ondulatoria ma non con la teoria corpuscolare.

La scoperta di questo fenomeno avvenne per la verità nel XVII secolo e fu opera di un gesuita, padre **Francesco Maria Grimaldi** (1618-1663), al quale si deve pure il nome di "diffrazione" attribuito al fenomeno. Ma il fenomeno stesso diventò un fatto rilevante e decisivo solo nel XIX secolo quando fu approfondito dallo stesso Young e anche dal fisico francese **Augustin-Jean Fresnel** (1788-1827).

Gli esperimenti dei fisici francesi **A. H. L. Fizeau** (1819-1896) e **J. B. L. Foucault** (1819-1868), condotti fra il 1849 e il 1850, portarono poi al calcolo della velocità della luce nei vari mezzi trasparenti.

Questa velocità nel vuoto (e praticamente anche nell'aria) è all'incirca di $3 \cdot 10^8$ m/s ed è maggiore della velocità della luce in ogni altro mezzo trasparente, concordemente a quanto faceva prevedere la legge di Snell.

Bisogna annotare, per dovere di cronaca, che una misura della velocità della luce nell'aria era stata ottenuta nel 1676 dal danese **Ole Rømer** (1644-1710), anche se il valore da lui trovato, circa $2,25 \cdot 10^8$ m/s, è piuttosto lontano da quello reale. L'errore è del 25%.

Prevale dunque, nella prima metà secolo XIX, il modello ondulatorio della luce su quello corpuscolare. Rimane, tuttavia, insoluto il problema del mezzo in cui l'onda luminosa si propaga.

Se non viene rimosso questo sassolino con risposte chiare e convincenti, tutto è ancora in discussione.

Comunque, una volta accettato che la luce è un'onda, come tutte le onde deve avere una sua frequenza f e, secondo il mezzo in cui si propaga, una lunghezza d'onda λ . Allora, se si indica con T il periodo dell'onda, cioè il tempo che impiega per coprire lo spazio λ , e si indica con v la sua velocità di propagazione nel mezzo preso in esame, si ha: $T = 1/f$, $\lambda = vT = v/f$.

4. La storia continua.

Nella seconda metà dell'Ottocento, il fisico/matematico scozzese **James Clerk Maxwell** (1831-1879) unificò in un'unica teoria fenomeni elettrici e magnetici, mediante quelle che sarebbero state chiamate *equazioni di Maxwell*. Comparvero per la prima volta nel 1865. Raggruppano leggi sperimentali già note, trovate in precedenza da scienziati diversi, quali per esempio Gauss, Faraday, Ampère.

Sulla base di queste equazioni è prevista l'esistenza di onde elettromagnetiche prodotte dalle oscillazioni di cariche elettriche lungo un circuito e propagantesi anche nel vuoto. E la luce è una particolare onda elettromagnetica e perciò non ha bisogno dell'etere per propagarsi. Può farlo anche nello spazio vuoto. Ma questa è solo teoria, una pura e semplice ipotesi. Urgono conferme sperimentali, che però Maxwell non riuscì a ottenere.

Ma, pochi anni dopo la sua morte, due esperimenti confermarono la sua teoria:

- Un esperimento, eseguito nel 1886 dal fisico tedesco **H. R. Hertz** (1857-1894), verificò l'effettiva esistenza di onde elettromagnetiche. In suo onore, la frequenza di un'onda elettromagnetica è calcolata in hertz (Hz). Precisamente: $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$.
- Un secondo esperimento, condotto nel 1887 dai fisici statunitensi **A. A. Michelson** (1852-1931) e **E. W. Morley** (1838-1923), mostrò che la luce non ha bisogno dell'etere per propagarsi. Com'è noto, il termine "etere" è comunque rimasto nel linguaggio comune per indicare uno spazio generico in cui le onde elettromagnetiche si propagano.

C'è di più. Di un'onda elettromagnetica furono calcolate le possibili frequenze, le quali formano il cosiddetto *spettro elettromagnetico*. In realtà, di solito, assieme alle frequenze delle onde (grandezze che dipendono dalle caratteristiche delle onde) sono rappresentate anche le loro lunghezze d'onda. Siccome però queste dipendono dal mezzo in cui l'onda si propaga, si precisa che lo spettro riguarda le lunghezze d'onda nel vuoto.

Questo spettro (delle frequenze e delle lunghezze d'onda nel vuoto) è rappresentato nella figura sottostante (figura 9), dove si può notare che le lunghezze d'onda diminuiscono via via che si passa dalle onde radio (le più lunghe) ai raggi cosmici, mentre nel medesimo tempo, ovviamente, le frequenze aumentano, rispettando sempre la legge $\lambda = c/f$, dove c è la velocità della luce nel vuoto, cioè: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

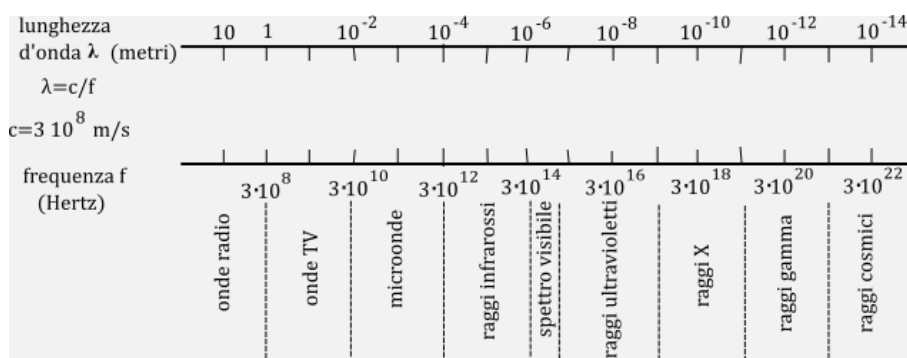


figura 9 – Spettro elettromagnetico

Come si può constatare, lo spettro della luce visibile copre un intervallo molto ristretto rispetto all'intero spettro delle onde elettromagnetiche. Precisamente, riferito alle lunghezze d'onda, l'intervallo compreso all'incirca fra 700 nanometri (rosso) e 390 nanometri (violetto). Questo, detto per inciso, spiega perché, nel fenomeno dell'interferenza da doppia fenditura e in quello della diffrazione i fori devono essere di piccolissima

dimensione, dovendo essere comparabili con la lunghezza d'onda. Una figura (figura 10), in cui i valori riportati sono valori intermedi, amplifica opportunamente lo spettro visibile.

lunghezza d'onda λ (nanometri)	678	604	580	530	485	462	412
1 nanometro = 10^{-9} metri							
1 teraHertz = 10^{12} Hertz							
frequenza f (teraHertz)	442	496	517	566	618	649	728

figura 10 – Spettro visibile

Occorre precisare che la scomposizione della luce bianca nei sette colori dello spettro visibile fu una scoperta di Newton. Egli, una volta isolato un pennello di luce solare (luce bianca), lo fece passare attraverso un prisma di vetro e notò che si scomponesse nei sette colori dell'arcobaleno (dal rosso, che è il colore che viene deviato di meno, al violetto, che è quello che viene deviato di più, passando per i colori arancione-giallo-verde-azzurro-indaco – figura 11). Ovviamente non in modo discreto, come rappresentato in figura, ma con continuità, con sfumature nel passaggio da un colore all'altro.

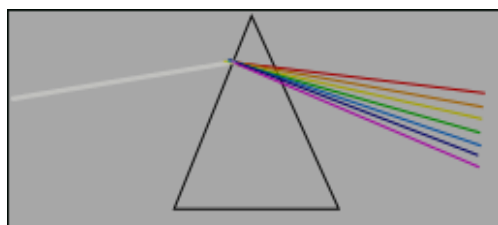


figura 11



figura 12

Lo stesso Newton inventò un disco, che è denominato per l'appunto *disco di Newton*, suddiviso in 7 settori colorati con i 7 colori dell'arcobaleno (figura 12). Facendolo ruotare a velocità idonea intorno al suo centro, i colori si mescolano e si ottiene una luce biancastra⁽²⁾. A riprova del fatto che la luce bianca è composta dai 7 colori dell'iride.

Newton ovviamente fornì una spiegazione del fenomeno della scomposizione della luce con la sua teoria corpuscolare.

Anche la teoria ondulatoria spiega egregiamente il fenomeno. E lo fa non solo dal punto di vista qualitativo, come lo fu con Newton, ma anche sotto l'aspetto quantitativo.

Insomma, si può dire che il XIX secolo segni il trionfo della teoria ondulatoria della luce.

Finalmente tutto è chiaro: la luce è un'onda. ... O no?

5. Verso la fine del XIX secolo sembrava che non ci fosse altro da dire sulla natura della luce. Tutti erano concordi nel considerarla un'onda, un'onda elettromagnetica.

Sennonché, negli anni 1887-1888, praticamente mentre Hertz da una parte e Michelson e Morley dall'altra eseguivano esperimenti favorevoli alla teoria ondulatoria, alcuni scienziati, uno dei quali l'italiano **Augusto Righi** (1850-1920), operando separatamente su fenomeni diversi, connessi alla propagazione della luce, giunsero alla scoperta di un nuovo fenomeno, che lo stesso Righi denominò *effetto fotoelettrico*. Consiste nella emissione di elettroni da parte di una lamina metallica (per esempio di sodio) contro la quale è proiettato un fascio di luce violetta. Gli elettroni emessi si allontanano dalla lamina con una determinata velocità.

Il fatto strano, e sconvolgente al tempo stesso, fu che non si riusciva a spiegare questo fenomeno in base alla teoria ondulatoria.

S'impone al riguardo una spiegazione.

² In verità, quello che denominiamo "disco di Newton" è già presente nell'*Ottica* di Tolomeo.

Bisogna tener presente che l'energia trasportata da un'onda luminosa è correlata all'intensità dell'onda: tanto più intensa, più forte è la sua luminosità tanto maggiore è l'energia che l'onda trasporta. Di modo che, se aumentava l'intensità della luce violetta che veniva spedita sulla lamina, ossia se aumentava l'energia della radiazione luminosa, ci si aspettava che aumentasse l'energia cinetica degli elettroni emessi dalla lamina e quindi la loro velocità. Ma questo non accadeva, la velocità degli elettroni non aumentava. C'era solamente un aumento del numero degli elettroni espulsi.

Si osservò inoltre che, se invece di luce violetta, si mandava sulla lamina luce di una frequenza più bassa, come per esempio luce rossa, ma pressappoco della stessa luminosità della luce violetta, venivano ugualmente espulsi elettroni ma con una velocità più bassa, mentre ci si aspettava che la velocità fosse la stessa.

Insomma la teoria ondulatoria era messa in seria crisi da questo nuovo fenomeno.

Gli scienziati all'inizio non ci capirono nulla e non riuscirono a darne una spiegazione.

Nel 1905, un giovane intraprendente, di nome **Albert Einstein** (1879-1955), riprendendo un'idea di qualche anno prima dello scienziato **Max Planck** (1858-1947), formulò la seguente ipotesi: ogni radiazione elettromagnetica, luce compresa, è costituita da *piccole particelle di energia*, che furono chiamati *quanti (di energia)*.

Ogni *quanto*, secondo l'interpretazione di Einstein, trasporta l'energia $E = hf$, dove f è la frequenza della radiazione ed h è una costante, chiamata *costante di Planck*.

Questa ipotesi di Einstein spiegava perfettamente l'effetto fotoelettrico, ma non spiegava altri fenomeni della luce, come la diffrazione e l'interferenza. Per questo all'inizio fu aspramente contestata dalla concezione dominante, ancorata alla teoria ondulatoria. Tra coloro che avversarono l'ipotesi di Einstein vi fu anche Planck, che pure per primo aveva ipotizzato l'esistenza dei "quanti". Ma solo una decina di anni dopo essa fu dimostrata sperimentalmente dal fisico statunitense **Robert A. Millikan** (1868-1953), proprio uno di coloro che l'avevano osteggiata. Fu così che l'ipotesi di Einstein fu confermata e perciò finì per imporsi.

Nel 1921, Einstein per la sua spiegazione dell'effetto fotoelettrico fu insignito del premio Nobel per la Fisica. Anche Millikan ebbe questo riconoscimento, ma nel 1923, mentre Planck l'aveva ottenuto nel 1918.

I quanti, a loro volta, a partire dal 1926 furono denominati *fotoni* dal fisico francese **M. Frithiaf Wolfers** (1891-1971) e la denominazione, ripresa dal chimico fisico statunitense **Gilbert N. Lewis** (1875-1946), divenne subito popolare e universalmente accettata.

Così, la teoria corpuscolare di Newton, che era stata scacciata un secolo prima, ritornava in auge.

I fisici si convinsero, a questo punto, che la luce avesse una doppia natura.

Diamo ancora una volta la parola ad Einstein e Infeld (3, pag. 272]:

«Vi sono fenomeni spiegabili con la teoria quantistica, ma non con la teoria ondulatoria. L'effetto fotoelettrico non è che uno dei tanti casi del genere. Vi sono invece fenomeni spiegabili con la teoria ondulatoria, ma non con la teoria dei quanti; la diffrazione della luce intorno a piccoli ostacoli ne è un esempio tipico. Finalmente esistono fenomeni come la propagazione rettilinea della luce che possono spiegarsi tanto con la teoria quantistica, come con la teoria ondulatoria».

La luce, dunque, ha una doppia natura: è onda ed è particella.

Ma, concordemente ad un principio, enunciato nel 1927 dal fisico danese **Niels Bohr** (1885-1962) e chiamato *principio di complementarità*, il suo duplice aspetto onda/particella non può essere osservato contemporaneamente nel corso di uno stesso esperimento: o si osserva l'uno o si osserva l'altro, ma non tutti e due.

6. Cosicché la luce, che si presentava con caratteristiche tali da non far dubitare che si trattasse di un'onda, un bel momento si manifestò invece come particella, ossia come materia.

Avviene forse anche il contrario, che cioè quello che appare come materia si possa manifestare come onda?

Questo interrogativo nel 1924 si tramutò in una vera e propria ipotesi. Fu formulata dal fisico e matematico francese **Louis de Broglie** (1892-1927).

E, ciò che è più sorprendente, trovò quasi subito conferma sperimentale.

Nel 1927, infatti, il fisico **C. J. Davisson** (1881-1958) e il suo collaboratore **L. H. Germer** (1896-1971), entrambi statunitensi, realizzarono un esperimento che mostrò la diffrazione dell'elettrone.

Si scoprirono così le *onde di materia* e, con il contributo determinante del fisico austriaco **Erwin Schrödinger** (1887-1961), nacque e si sviluppò la *meccanica ondulatoria*.

Ma sono andato oltre quelle che erano le mie intenzioni e la chiudo qui.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] Carl. B. Boyer, *Storia della matematica*, Milano, Mondadori, 1980.
- [2] René Descartes, *La diottrica*, in *Opere 1637-1649* (a cura di Giulia Belgioioso), Milano, Bompiani, 2009.
- [3] Albert Einstein e Leopold Infeld, *L'evoluzione della fisica*, Torino, Boringhieri, 1965.
- [4] Euclide, *Ottica e Catottrica*, in *Tutte le opere* (a cura di Fabio Acerbi), Milano, Bompiani, 2008.
- [5] Alberto Pala, *Introduzione a: Isaac Newton, Principi matematici della filosofia naturale*, Torino, UTET, 1965.
- [6] Wikipedia, Enciclopedia libera on-line.